

沿岸海洋と外洋との関わり

馬谷, 紳一郎
九州大学応用力学研究所 : 助手

山形, 俊男
九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4743820>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 65, pp.9-16, 1987-12. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



沿岸海洋と外洋との関わり

馬谷 紳一郎* 山形 俊男**

概 要

中規模渦に対する沿岸海洋の応答を数値的に調べた。地衡流調節の過程で励起された Kelvin jet はその非線形性により「急潮」と良く似た現象を引き起こす。又、残された地衡流渦は回転系に拡張された鏡像効果により岸に沿う方向に移動する。沿岸の地形を考慮した実験は観測された暖水の移動を良く再現することが示された。

Key words: coast, eddy, geostrophic adjustment, Sagami Bay, Kyucho, mirror image, topographic β -effect, Wakasa Bay

1. はじめに

海洋には多数の渦が存在し、これらが海洋の変動に果している役割は興味ある問題である。外洋の中規模渦は既に数多く観測されており¹⁾、衛星による観測や数値モデルの開発によってその挙動は次第に解明されつつある²⁾。

ところでこの様な渦が沿岸海洋に侵入して来た時どのような変動を引き起こすかは、重要な問題である。何故なら我々の生活は沿岸海洋と密接に関連しており、その変動は水質保全や漁業等に直接影響を及ぼす為である。実際、相模湾で古くから知られている「急潮」は沿岸漁業に大きな被害を与えており³⁾⁴⁾、また我々が若狭湾で観測した暖水塊の侵入は、湾の効率的な海水交換の可能性の面で例えば原子力発電所の温排水問題等と関係してくる⁵⁾⁶⁾。これらの現象は渦を仲立ちにした、外洋の沿岸海洋への働きかけの現われと考えられる。

2. モデル実験

GFDL のモデルを基礎にして開発した非線形浅水モデルを使用し、横 300 km, 縦 150 km のモデル海洋で数値実験を行った。コリオリパラメータは北緯 35 度に相当する $f=8.3 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ に固定されている。このモデル海洋に水深偏差が、

$$h = h_0 \exp(-r^2/L^2) \quad (1)$$

* 九州大学助手, 応用力学研究所

** 九州大学助教授, 応用力学研究所

で与えられる渦を置いた時の時間発展を調べる。ここで r は渦の中心 (x_0, y_0) からの距離であり、 $r = \{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2\}^{1/2}$ で与えられる。また $L = 15 \text{ km}$, $h_0 = 10 \text{ m}$, -10 m である。 $g^* = 1.0, 2.0 \text{ cm sec}^{-2}$ で行った実験を示す。これらの値は若狭湾における観測⁵⁾⁶⁾を基にして設定された。初期の流速場は(1)式と地衡流バランスをしている。

図1, 2に水深が一定($H = 50 \text{ m}$)の場合の渦の時間発展が示されている。図1は $h_0 = +10 \text{ m}$, 図2は

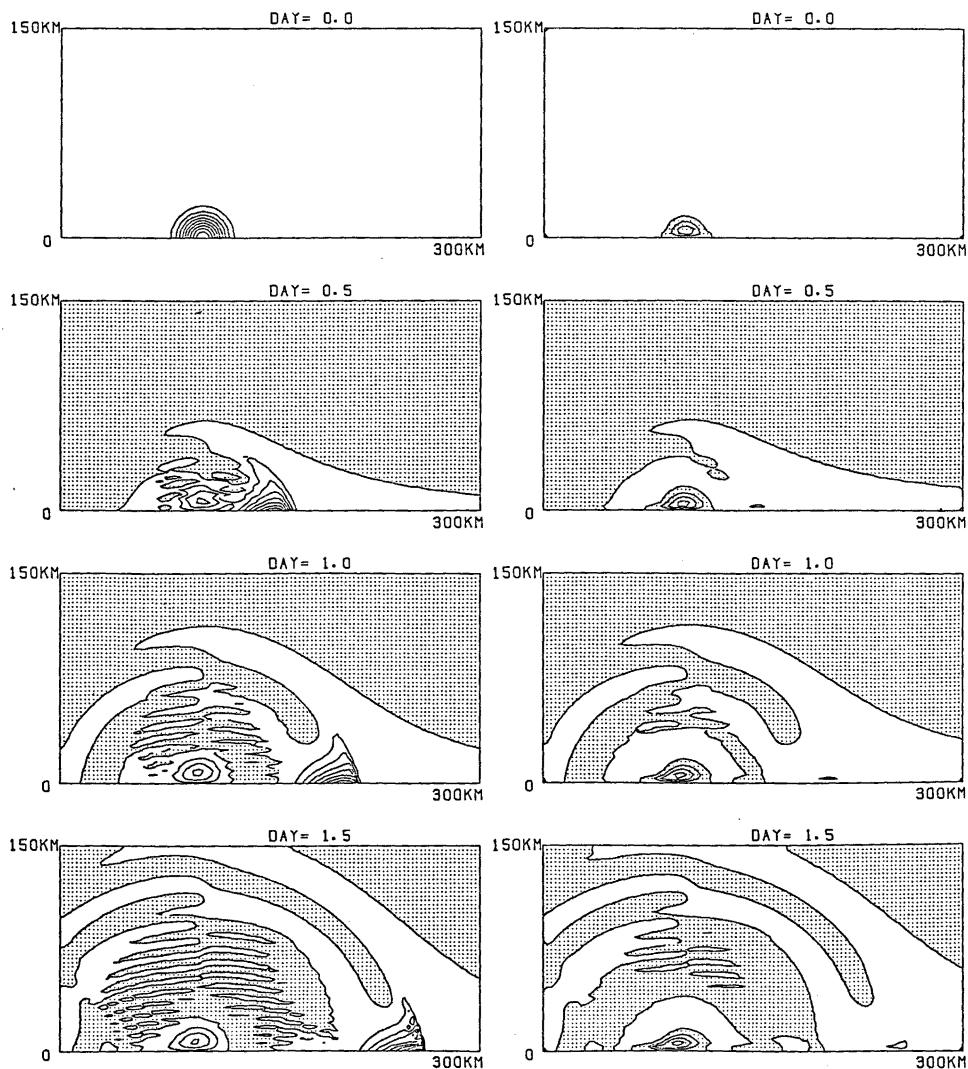


図1 岸近くに置かれた暖水渦の水深偏差 h (左側) と相対渦度 ζ (右側) の時間発展。 $h_0 = +10 \text{ m}$, $H = 50 \text{ m}$, $g^* = 2.0 \text{ cm sec}^{-2}$. h , ζ の等値線の間隔は各々 1.0 m , 10^{-5} sec^{-1} . 点を打った部分は値が負。時間々隔は 0.5 日。

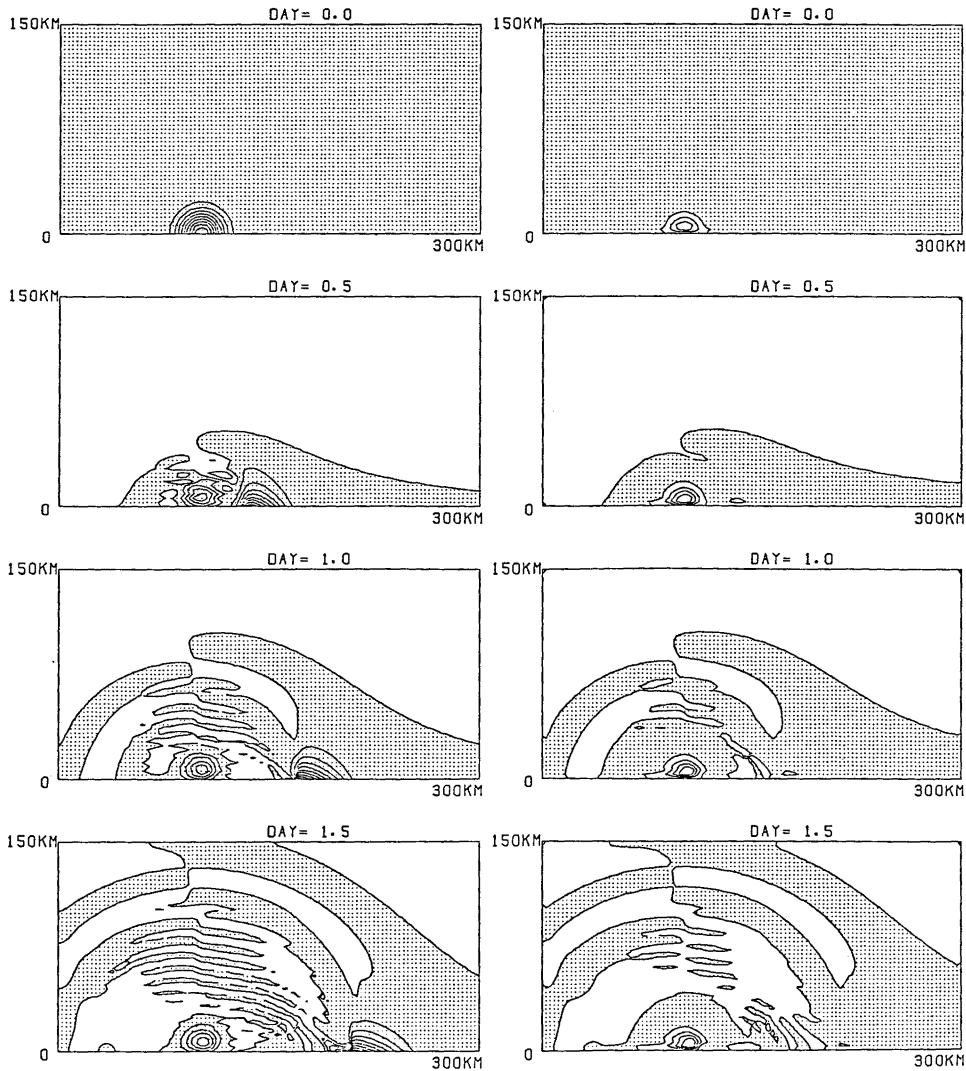


図2 岸近くに置かれた冷水渦の h と ζ の時間発展. $h_0 = -10$ m. その他は図1と同様.

$h_0 = -10$ m の場合であり各々暖水渦, 冷水渦に相当する. 図の左側が h の, 又右側が相対渦度 ζ の時間発展を示している. いずれの場合も初期の渦が主として二つの部分に分離している. 一つは速い速度で岸を右に見る方向に進行する Kelvin jet であり, もう一つは岸の影響の下で地衡流調節された地衡流渦である. これは渦が初期に岸から十分離れている場合には見られない特徴である. Kelvin jet はその非線形効果の為に前者ではその先端部が, 後者ではその後端部が時間の経過と共に立ち上がってくる⁷⁾. またその進行速度は, ほぼ $c = (g \cdot H)^{1/2} = 1.0 \text{ m sec}^{-1}$ となっている. ここに示された暖水フロントの, 岸を

右に見る方向の速い進行は「急潮」がこの様な原因で生じていることを示唆している。

後に残された地衡流渦は図 1 の場合には左方向へ、又図 2 の場合には右方向へゆっくりと移動している。この現象は非回転系では良く知られている渦の鏡像効果を、回転系に拡張すれば説明可能である。即ち循環 Γ を持つ渦糸は回転系ではその回りに、

$$V_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r_i} K_1(r/r_i) \quad (2)$$

の周方向の速度場を誘起する⁹⁾。ここで r_i は $r_i = (g^* H)^{1/2} / f$ で定義される内部変形半径であり、 K_1 は一次の変形 Bessel 関数である。従ってこの渦糸は岸が存在する場合、

$$U_e = \frac{\Gamma}{2\pi r_i} K_1(2d/r_i) \quad (3)$$

の速度で岸に平行に進行すると考えられる。ここで d は岸と渦糸との距離である。 $f \rightarrow 0$ の場合には (3) 式から、

$$U_e \rightarrow \frac{\Gamma}{4\pi d} \quad (4)$$

となり良く知られた非回転系での結果と一致する⁹⁾。図 1, 2 の地衡流渦は渦糸とは異なっているが、その渦度は中心に集中しているので Γ を、図 1 では ζ の負の部分、図 2 では正の部分の面積分で近似できるであろう。この仮定は非回転系で行った同種の数値実験でその結果が (4) 式を良く満足することから妥当であると考えられる。図 3 に実験により得られた U_e と Γ との関係が示されている。実線及び破線は各々 (3) 式、(4) 式に基づく理論曲線である。これは、地衡流渦の移動が (3) 式により良く説明できることを示している¹⁰⁾。またこの結果は回転系では非回転系に比較して鏡像効果は渦が岸から離れるに従って急速に減少することを示している。

図 4 は水深が変化している時の渦の時間発展である。水深は下側の岸で 50 m であり、沖合い 60 km での水深 300 m まで直線的に変化している。図の左側は初期に暖水渦を、右側は冷水渦を置いた場合の時間発展である。どちらの場合も地衡流調節の初期の段階で Kelvin jet を生成し、その後は渦対を作りながら浅い方を右に見る向きに移動している。これは水深が変化する為に生ずる地形性 β 効果の為であり、陸棚波と

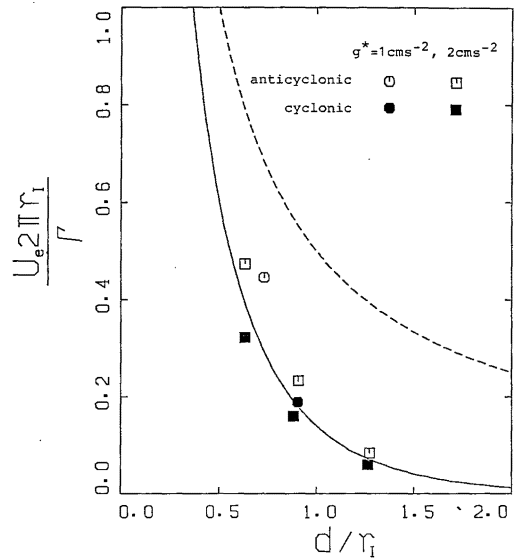


図 3 地衡流渦の岸に沿う方向の進行速度 U_e と岸からの距離 d との関係。白(黒)の印は暖水渦(冷水渦)の場合。丸(四角)は $g^* = 1.0 \text{ cm sec}^{-2}$ (2.0 cm sec^{-2}) の場合。実線(破線)は (3) 式 ((4) 式) に基づく理論曲線。

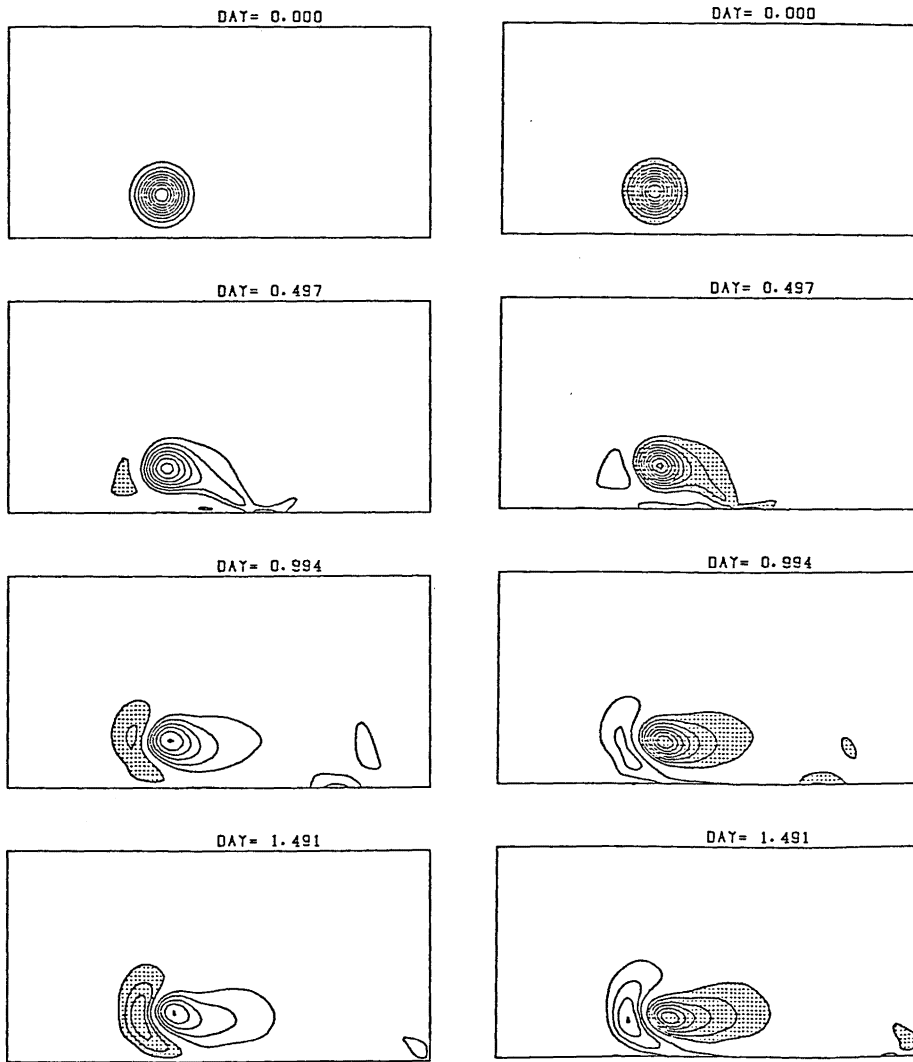


図4 水深が変化する場合、渦の水深偏差 h の時間発展。左側（右側）は $h_0 = 10 \text{ m} (-10 \text{ m})$ 。水深は下側の岸で 50 m 、沖合い 60 km で 300 m 、その間は直線的に変化。点を打った部分では h が -0.1 m より小さい。

本質的に同じ機構が働いている¹¹⁾。水深が一定の場合にはこの位置では渦はまったく動かなかったことと好対象である¹⁰⁾。沿岸海洋での渦の挙動は海底地形が重要になる場合も多く、海底地形と成層の効果が重要になる現象には浅水モデルでは限界がある為、三次元モデルの開発が急がれる。

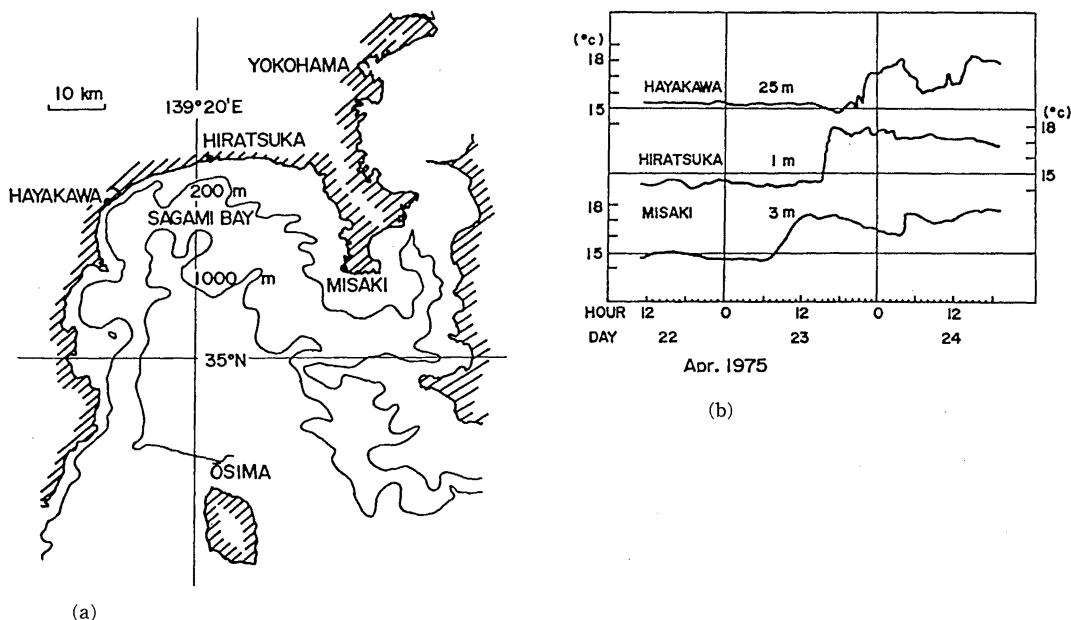


図5 相模湾の地形図とそこで観測された水温の急激な変化。(a) 相模湾の海岸地形と海底地形図。(b) 三崎、平塚、早川における水温の時間変化。

3. 沿岸海洋における短期変動

図5は相模湾における急潮の観測例である。図5(a)は相模湾の地形を示している。この湾は図からも判るように急激に水深が増加しており壁のような海底地形を持っていることが特徴である。また黒潮が近くを通ることもあり、外洋の渦の湾への侵入の可能性が高いと考えられる。図5(b)は三崎、平塚、早川における水温の時間変化である。水温の急激な上昇が岸を右に見る方向に約 1 m sec^{-1} の速さで伝わっており⁴⁾¹²⁾、図1に示した Kelvin jet の進行と同様な現象と考えられる。

Kelvin jet の発生には沖合い方向の水深変化は本質的では無く、むしろ岸が壁のように働くことが重要である。この条件には、相模湾の北西部が合致しており、ここで数多く急潮が観測されているという宇田³⁾の報告とも矛盾しない。

図6の左側には若狭湾に於ける観測で得られた、水深50mでの水温分布を示し、右側には対応する地形を設定して行った実験の結果を示している。両者とも最上段の図は海底地形及び海岸地形を示している。結果は第二段目から時間の経過に従って示されている。左図に示されるように8月22日に湾の西側に偏在していた暖水域が、2日後には湾全域に拡がる現象が観測されたが、これは右図の実験でも再現されている。湾外の観測値が欠落している事を考慮すればこの両図はかなり良く一致していると言える。水塊解析によれば、観測された暖水域は水塊として進行しており⁵⁾、これは湾の海水交換過程を考える上で重要な特徴の一つである。しかしここで用いた数値モデルではこの特徴が再現されたかどうか判定するのは困難である。

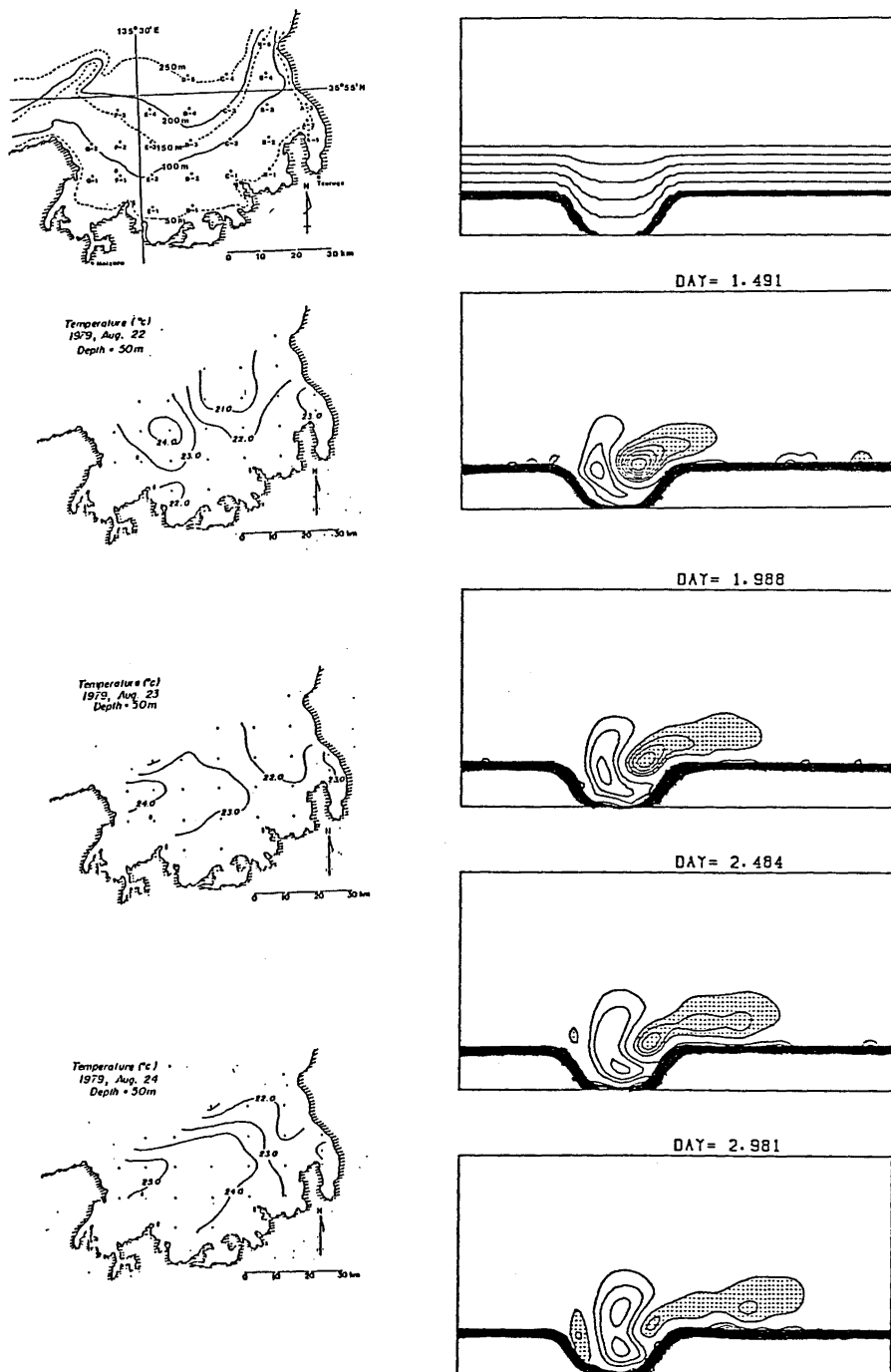


図6 若狭湾における水深50 mでの水温分布の時間変化と、これに対応させた数値実験の結果。左側(右側)が観測(数値実験)。右図の太い線は水深50 m。但し、50 m 以浅は陸地。最上段の図は海岸地形及び海底地形を示す。沖合いに向かって50 m 間隔で等深線が描かれている。

4. ま と め

浅水方程式を使用した数値モデルにより、海洋の渦に対する沿岸域の影響を調べた。岸が存在する時、渦は地衡流調節の過程で Kelvin jet を励起し、相模湾で観測されている急潮と良く似た現象を引き起こす。又、後に残された地衡流渦の岸に沿う方向の移動速度は、回転系に拡張された鏡像効果で良く見積られる。しかしこの効果は非回転系に比べて小さく、特に渦と岸との距離が内部変形半径の程度を越えると急速に小さくなる。水深変化を考慮した実験では地形性 β 効果の為に渦は浅い方を右に見る向きに進行する。これは若狭湾で観測された暖水渦の湾での挙動を良く説明する。この様な現象は海洋では短周期の現象と考えられ、その理解の為に従来の観測に加えて衛星による観測の強化や数値実験等を統合した総合的研究が今後必要となって来るであろう。

5. 謝 辞

観測に関しての、益永典明氏（福井県水産試験場）及び観測船福井丸の皆様の協力を感謝いたします。計算は、九州大学応用力学研究所、海洋特別事業費により行われました。記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) McWilliams, J. C. et al.: The Local Dynamics of Eddies in the Western North Atlantic. In: Eddies in Marine Science, ed. by A. R. Robinson, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- 2) Holland, W. R., D. E. Harrison and A. J. Semtner, Jr.: Eddy-Resolving Numerical Models of Large-Scale Ocean Circulation. In: Eddies in Marine Science, ed. by A. R. Robinson, Springer-Verlag, Berlin, 1983.
- 3) 宇田満隆：相模湾の急潮とその予知について，日本海洋学会誌，9，15-22，1953.
- 4) 松山優治，岩田静夫：相模湾の急潮について（I）1975年に起った急潮，水産海洋研究会会報，30，1-17，1977.
- 5) Yamagata, T., S. Umatani, N. Masunaga and T. Matsuura: Observations of an intrusion of a warmer and less saline water mass into a bay, Cont. Shelf Res., 3, 475-488, 1984.
- 6) Umatani, S., N. Masunaga and T. Yamagata: Further study of synoptic variability in Wakasa Bay, Japan, Prog. Oceanog., 17, 359-373, 1986.
- 7) Bennett, J. R.: A theory of large-amplitude Kelvin waves, J. Phys. Oceanogr., 3, 57-60, 1973.
- 8) Pedlosky, J.: Geophysical fluid dynamics, 1st edition, Springer-Verlag, Berlin, 1979.
- 9) Batchelor, G. K.: An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 1970.
- 10) Umatani, S and T. Yamagata: Evolution of an isolated eddy near a coast and its relevance to the "Kyuchō", J. Oceanogr. Soc. Japan, 1987, (in press).
- 11) Mysak, L. A.: Recent Advances in Shelf Wave Dynamics, Rev. Geophys. Space Phys., 18, 211-241, 1980.
- 12) Yamagata, T.: A theory for propagation of an oceanic warm front with application to Sagami Bay, Tellus, 32, 73-76, 1980.

(昭和 62 年 5 月 30 日 受理)